

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 Kajian Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Leonardo G. Baltar dan Josef A. Nossek pada tahun 2012 membahas mengenai *Multicarrier systems: a comparison between Filter Bank based and Cyclic Prefix based OFDM*. Penelitian melakukan tinjauan terhadap FBMC dan membuat perbandingan dengan OFDM berbasis *Cyclic Prefix* (CP) kemudian dilakukan pengukuran spektral dan *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) secara ringkas. Penelitian ini meninjau model *subcarrier* yang digunakan dalam derivasi *equalizer* saluran per *subcarrier* yang ditemukan pada literatur terbaru dan menyajikan metode baru per-estimasi saluran *subcarrier* berdasarkan model yang sama [5]. Metode penelitian dilakukan dengan membandingkan kinerja FBMC dan CP-OFDM dengan menampilkan beberapa hasil simulasi BER, ketika kedua sistem menempati *bandwidth* dan hasil yang sama. Selanjutnya dengan estimasi saluran FBMC masih mencapai keunggulan lebih dari 1 dB pada  $E_b/N_0$  dibandingkan dengan CP-OFDM.

Penelitian ini dapat dikembangkan pada  $E_b/N_0$  karena terbukti nilai *gain* lebih baik daripada OFDM ketika *receiver* telah menentukan *subcarriers impulse response* dan juga setiap *subcarrier* MMSE *equalizer* yang sudah digunakan. Penelitian ini juga menyajikan skema baru untuk estimasi saluran dari *respons impuls subcarrier*. Berdasarkan hasil simulasi dapat terlihat bahwa sistem FBMC masih dapat mencapai gain lebih dari 1 dB untuk nilai  $E_b/N_0$  melalui CP-OFDM ketika penerima harus memperkirakan hasil *respons impuls subcarrier* dan *equalizer* MMSE per *subcarrier* yang digunakan.

Pada penelitian yang dilakukan Ravi Sekhar Yarrabothu, Sadhana Kandukuri, Usha Rani Nelakuditi, dan M. Krishna Chennakesava Rao pada tahun 2017 membahas mengenai *Performance analysis of a 5G non-orthogonal waveform filter bank multi carrier*. Pada generasi 5G dibutuhkan lebih banyak kecepatan data yang didukung oleh komunikasi M2M, kemudian saat ini OFDM mempunyai kelemahan seperti PAPR yang tinggi,

pemborosan spektrum karena *Cyclic Prefix*, dan *Out of Band Emissions*. Solusi untuk mengatasi masalah ini maka penelitian ini mencari bentuk gelombang *multicarrier* lain yaitu FBMC. Penelitian ini akan mengimplementasikan *Poly-phase network filter bank multicarrier* (PPN-FBMC) yang bisa menurunkan kompleksitas dan komputasi yang tinggi [6]. Metode penelitian yang digunakan ialah *prototype* filter untuk PPN FBMC faktor *overlapping* yang tinggi ( $K=6$  dan  $K=8$ ). Kemudian disimulasikan dengan MATLAB dan dibandingkan dengan OFDM seperti performansi *Error Vector Magnitude* (EVM), PAPR, dan *Power Spectral Density*. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk menganalisis kinerja sistem FBMC dalam berbagai kondisi *fading* secara *real time*.

Pada penelitian ini hasil ditampilkan dari beberapa paramater pengujian yakni *waveform filter*, *EVM analysis*, *PSD analysis*, dan *CCDF analysis*. Hasilnya menunjukkan bahwa OFDM memiliki probabilitas lebih tinggi untuk membawa sinyal dengan PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) lebih tinggi daripada FBMC. Setelah diamati lebih lanjut didapatkan hasil bahwa dengan meningkatnya faktor penyebaran  $K$ , kinerja FBMC PAPR jauh lebih baik dibandingkan OFDM.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Imran, Aamina Hassan, dan Adnan Ahmed Khan pada tahun 2020 membahas mengenai *5G Waveform Competition: Performance Comparison and Analysis of OFDM and FBMC in Slow Fading and Fast Fading Channels*. Filter Bank ini dapat mengatasi kekurangan yang timbul karena penggunaan *Fast Fourier Transform* pada *trade-off* untuk menambahkan kompleksifitas ke sistem yaitu *Poly-Phase Filter Networks* (PPN). Penelitian ini mengukur dengan paramater *Out Of Band Emission* (OOBE), *Power Spectral Density* (PSD), dan *Bit Error Probability* (BEP) [7]. Metode Penelitian dilakukan dengan membandingkan filter OFDM dan FBMC yang disimulasikan dalam domain waktu dan domain frekuensi. Penelitian ini mengusulkan FBMC sebagai bentuk gelombang 5G karena radiasi OOB yang jauh lebih rendah. FBMC adalah salah satu dari skema terbaik untuk dipertimbangkan karena memiliki koefisien frekuensi lokal dan tingginya efisiensi spektrum.

Pada penelitian yang sama BEP Model Kanal Kendaraan A yaitu merupakan salah satu kendaraan yang digunakan menunjukkan hasil bahwa FBMC berkinerja lebih baik daripada OFDM di saluran seluler. CP-OFDM menunjukkan BEP yang lebih baik daripada FBMC pada kecepatan yang lebih rendah tetapi pada kecepatan yang lebih tinggi FBMC akan lebih unggul. CP-OFDM menunjukkan BEP rendah dalam kecepatan rendah karena CP sangat cocok untuk *multipath fading*. Ini menunjukkan bahwa ketika saluran didominasi oleh pergeseran *Doppler*, FBMC memiliki kinerja lebih baik daripada CP-OFDM. Dapat diketahui bahwa kinerja OFDM tanpa menggunakan CP dinilai sangat buruk pada kedua saluran *fading*.

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Generasi ke-5 (5G)**

Teknologi jaringan seluler semakin berkembang. Meskipun teknologi telekomunikasi berkembang dengan sangat pesat, masih terdapat tantangan terhadap peningkatan permintaan kecepatan akses data berikut dengan kehandalan dari layanan dimana teknologi 4G pun tidak dapat memenuhi dan hal ini yang memacu adanya penelitian terhadap teknologi terkini untuk memenuhi kebutuhan tersebut. 5G NR merupakan sebuah istilah untuk menyebut generasi kelima sebagai fase berikutnya dari standar telekomunikasi seluler yang melebihi standar 4G. Dalam teknologi 5G NR, data akan dikirimkan melalui gelombang radio yang akan dibagi menjadi frekuensi-frekuensi yang berbeda. Setiap frekuensi yang berbeda tersebut akan disiapkan untuk tipe komunikasi yang berbeda pula, seperti siaran televisi dan *mobile data*. Penggunaan frekuensi-frekuensi ini diregulasikan oleh badan *International Telecommunication Union (ITU)*.

Sebagian besar teknologi 5G NR menggunakan frekuensi di atas 6 GHz atau biasa disebut *millimeterWave*. Layanan 5G NR mensyaratkan kecepatan, cakupan, dan kehandalan serta menuntut solusi dalam jaringan yang berbeda, baik dalam bentuk evolusi jaringan yang sudah ada maupun potensi jaringan yang baru. Keuntungan dari sinyal dengan frekuensi tinggi yaitu kemampuan kecepatan data yang lebih besar. Tetapi, hal yang sangat signifikan dari

keuntungan tersebut dapat berupa jarak yang dapat ditempuh frekuensi tinggi adalah sangat pendek dan lebih sulit menembus dinding bangunan. Hal ini akan menciptakan munculnya ribuan bahkan jutaan *base station mini* dan *smart cells* yang akan diletakkan pada setiap menara; bangunan; rumah; bahkan ruangan. Itulah sebabnya mengapa 5G diperkirakan hanya akan mampu melengkapi 4G, bukan menggantikan posisi 4G di teknologi jaringan seluler [8].

### 2.2.2 Implementasi Layanan 5G

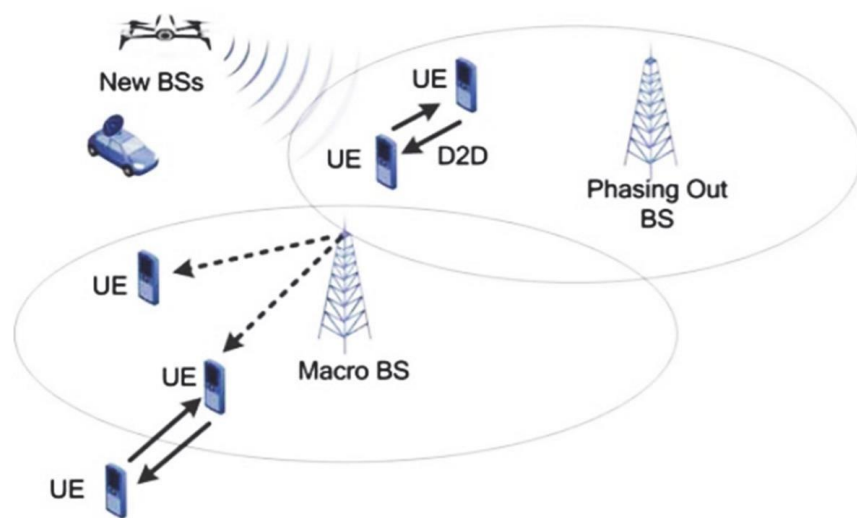
#### A. Komunikasi *Machine to Machine* (M2M)

Komunikasi M2M dianggap sebagai salah satu andalan untuk penyedia aplikasi canggih seperti *smart cities*; *automatic vehicle*; dan *automatic industry*. Jenis komunikasi ini melibatkan komunikasi mesin dengan mesin lainnya dan bertukar informasi menggunakan *remote services* melalui jaringan seluler. Pada peningkatan jaringan radio akses LTE *Advanced* yang dipelajari oleh 3GPP untuk komunikasi 2M, membahas tentang isu-isu kelebihan kapasitas kontrol; dukungan perangkat jaringan M2M; pengurangan biaya perangkat dan peningkatan cakupan radio akses [12].

#### B. Komunikasi *Device to Device* (D2D)

Dalam mengatasi peningkatan kepadatan trafik, dan mengatasi keterbatasan cakupan *cell* pada teknologi 5G, telah dikembangkan komunikasi *device-to-device* (D2D). Komunikasi D2D merupakan fitur yang memungkinkan *user* dapat berkomunikasi secara langsung tanpa melalui *access point* atau *base station*. Teknologi ini memungkinkan dua unit *user equipment* (UE) berkomunikasi satu dengan yang lain pada jarak tertentu, dan salah satu fitur lain yang sedang dikembangkan adalah dimana satu *user* yang didalam cakupan sel jaringan, dapat membagikan aksesnya dan memperluas cakupan sel dari jaringan. Selain pada perangkat *user* D2D juga akan berguna dalam perkembangan *Internet of Things* (IoT), dimana alat-alat akan saling terhubung dan dapat

berkomunikasi. Salah satu contohnya adalah pada sensor-sensor yang saling terhubung, bertukar data, dan dapat membuat keputusan secara otomatis. Pemanfaatan lain dari komunikasi D2D adalah dapat membantu mengembalikan kondisi layanan pada daerah paska bencana [13]. Dapat dilihat pada Gambar 2.3, bagaimana sistem komunikasi D2D dapat membantu membangun kembali jaringan seluler paska bencana.



**Gambar 2.1 Ilustrasi Penggunaan D2D untuk Aplikasi Penanggulangan Jaringan pada Paska Bencana [13]**

### 2.2.3 Kapabilitas dan Persyaratan 5G

Teknologi 5G hingga sekarang belum mempunyai penetapan standar yang berlaku di dunia, namun para organisasi telekomunikasi di dunia masih berlomba-lomba melakukan penelitian. Terdapat organisasi internasional yang meregulasi radio dan telekomunikasi internasional bernama *International Telecommunication Union* (ITU). Organisasi ini telah mengeluarkan rekomendasi untuk tahun 2020 yaitu ITU-RM.0283-02, dimana visi nya tertera dalam program *International Mobile Telecommunication* tahun 2020 dan seterusnya. Mengacu pada visi IMT yaitu *Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*, masa depan pengembangan kapabilitas 5G yang

dibandingkan dengan teknologi sebelumnya dirangkum dalam Tabel 2.1 berikut [14].

**Tabel 2.1 Rekomendasi Pengembangan Kapabilitas  
5G dari ITU [14]**

<b>Parameter</b>	<b>IMT-2020</b>	<b>IMT <i>Advanced</i></b>
<i>Peak Data Rate</i> (Gbps)	20	1
<i>User Experienced Data Rate</i> (Mbps)	100	10
<i>Spectrum Efficiency</i> (bps/Hz)	30	10
<i>Mobility</i> (km/h)	500	350
<i>Latency</i> (ms)	1	10
<i>Area Traffic Capacity</i> (Mbps/m <sup>2</sup> )	10	0.1
<i>Connection Density</i> (dev/km <sup>2</sup> )	10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>

Nilai parameter pada Tabel 2.1 tidak tepat pada nilai maksimal untuk sistem 5G secara umum. Untuk mMTC, prioritas utamanya adalah *connection density* (kepadatan koneksi), sedangkan *spectrum* dan *peak data rate* tidak sangat dibutuhkan. Untuk URLLC, prioritas utamanya *latency* dan *mobility*. Dan untuk eMBB, *area traffic capacity*, *peak data rate*, *user experienced data rate*, *latency*, *mobility*, dan *connection density* merupakan parameter penting [14].

#### **2.2.4 5G Frequency Spectrum**

*Global System for Mobile Communications Association* (GSMA) dengan ITU-R mengklasifikasikan 3 spektrum frekuensi yang akan dipergunakan pada jaringan 5G yaitu [15]:

- 1) Spektrum Sub 1 GHz pada spektrum dibawah 1 GHz ini teknologi 5G memanfaatkan *legacy network* 1G/2G/3G/4G, layanan spektrum ini menyediakan jaringan di *urban*, *suburban*, dan *rural* yang lebih luas dan *range* frekuensi dibawah 1 GHz mencakup area yang sangat luas cocok dalam mendukung penuh layanan IoT.

- 2) Spektrum 1-6 GHz, pada rentang frekuensi ini merupakan spektrum paling ideal untuk kapasitas dan *coverage* dan pada *range* spektrum 3.3-3.8 GHz ini merupakan pilihan awal bagi para seluruh operator untuk menerapkan jaringan 5G.
- 3) Spektrum diatas 6 GHz pada *range* ini penerapan dari *ultra-high broadband speed* yang dapat bekerja ideal pada frekuensi antara 26 GHz dan 28 GHz dimana frekuensi ini yang di alokasikan paling banyak di dunia internasional.

Pada 21 Desember 2017 3GPP TSG RAN berhasil menyetujui spesifikasi NR 5G pertama yang dapat diterapkan. Penyelesaian standar NR 5G pertama memungkinkan pengembangan skala penuh 5G NR untuk uji coba skala besar dan penggunaan komersial pada awal 2019. Spesifikasi pertama ini selesai sebagai bagian dari rilis 15 3GPP. Sesuai dengan rilis 3GPP 15, pita frekuensi untuk 5G NR telah ditetapkan dan memberikan daftar pita di mana 5G NR dapat beroperasi. Spesifikasi mendefinisikan pita frekuensi sebagai FR1 dan FR2 [16].

**Tabel 2.2 Spesifikasi *Frequency Ranges* 5G NR [16]**

<b>Pita</b>	<b>Frekuensi</b>	<b>Tipe</b>
FR1	450 to 6000 MHz	Sub 6 GHz
FR2	24250 to 52600 MHz	mmWave

### 2.2.5 Kanal Wireless

Kinerja sistem komunikasi *wireless* sangat bergantung pada keadaan lingkungan kanal yang mengakibatkan kanal *wireless* dinamis dan tidak dapat diprediksi [17]. Karakteristik yang menentukan kanal *wireless* pada komunikasi bergerak adalah variasi dari kekuatan kanal dari waktu ke waktu dan tiap frekuensi, yang dibagi menjadi dua tipe [18]:

- *Large-scale fading*, yang disebabkan oleh *path loss* pada sinyal sebagai fungsi dari jarak dan *shadowing* dari objek yang besar seperti bangunan dan bukit. *Large-scale fading* lebih relevan pada masalah seperti perencanaan *cell-site*.

- *Small-scale fading*, yang disebabkan interferensi yang konstruktif dan destruktif dari *path* sinyal jamak antara pemancar dan penerima. Hal ini terjadi pada skala spatial dari panjang gelombang pembawa dan bergantung pada frekuensi. *Small-scale multipath fading* lebih relevan pada desain kehandalan dan efisien sistem komunikasi.

Pada propagasi gelombang radio oleh *transmitter* hingga diterima oleh *receiver* dengan media udara maka menggunakan lebih dari satu jalur (*multipath*). Banyaknya jalur gelombang radio saat propagasi hingga mencapai *receiver* akan mengalami beberapa fenomena seperti *line-of-sight* (LOS) atau *non-line-of-sight* (NLOS). Propagasi NLOS dapat berupa *reflection*, *diffraction*, dan *scattering* yang mempengaruhi propagasi kanal *wireless*.

- a. *Reflection* (Pemantulan) merupakan fenomena fisik yang terjadi ketika propagasi gelombang elektromagnetik menimpa suatu objek yang berdimensi sangat besar dibandingkan dengan panjang gelombang, seperti permukaan bumi dan bangunan. Hal tersebut menyebabkan *power* sinyal yang dipancarkan dipantulkan kembali dari asalnya [17].
- b. *Diffraction* terjadi saat sinyal radio melewati objek yang cukup besar dan memiliki permukaan tajam sehingga sinyal tersebut mengalami pembengkokan seolah-olah menghasilkan sumber sekunder, seperti puncak bukit, gedung, dan lain-lain.
- c. *Scattering* terjadi saat sinyal melewati objek yang memiliki bentuk tidak beraturan dan dimensinya lebih kecil dari dibandingkan panjang gelombang sinyal sehingga sinyal berhambur ke banyak arah.

Karakteristik penting pada *multipath channel* adalah waktu *delay spread* yang berakibat pada sinyal yang diterima. *Delay spread* ini sama dengan waktu *delay* antara kedatangan komponen sinyal yang pertama diterima (LOS atau *multipath*) dan komponen sinyal yang terakhir diterima. Hal ini dapat digambarkan dengan *single pulse* yang dipancarkan melalui *multipath channel* dan sinyal yang diterima akan muncul sebagai *pulse train*



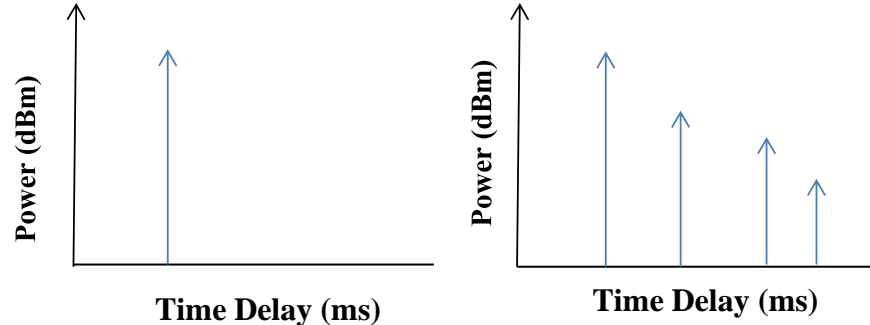
yang mana tiap *pulse* berkaitan pada komponen LOS atau komponen *multipath* berbeda [19].

### 2.2.6 Kanal *Narrowband*

*Narrowband* memiliki karakteristik kanal di mana *bandwidth* informasi tidak melebihi *coherence bandwidth*. Sistem *narrowband* tidak akan mengalami *frequency selective* atau dispersi *delay* yang signifikan. Untuk kanal *narrowband* (seperti radio FM yang beroperasi 25-30kHz), sebuah *receiver* hanya menggunakan satu *path* sehingga *receiver* melihat sinyal komposit tunggal yang merupakan jumlah vektor dari komponen *multipath* [20]. Berdasarkan teori Shannon-Hartley, kapasitas kanal *narrowband* dapat dihitung dengan [21].

$$C = B \log_2(1 + \gamma) \text{ bit/s} \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 menunjukkan  $C$  (bps/Hertz) merupakan kapasitas kanal dalam kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).  $B$  adalah *bandwidth* dari kanal (Hz) dan  $\gamma$  adalah *signal-to-noise-ratio* (dB).



**Gambar 2.2 Respon Impuls Kanal: (a) *Narrowband*  
(b) *Broadband* [21]**

### 2.2.7 Kanal *Broadband*

*Broadband* merupakan karakteristik *channel* di mana *bandwidth* informasi melebihi *channel coherence bandwidth*. Sistem *broadband* akan mengalami *frequency selective* atau dispersi *delay*. Ketika sinyal bukan *narrowband* maka akan terjadi distorsi karena *multipath delay spread*. Pada *multipath fading* atau kanal *broadband*, kapasitas kanal berdasarkan teori Shannon pada kanal *broadband* yaitu [22] [23]:

$$C \approx \frac{B}{N} \sum_{i=1}^n \log_2(1 + (|\psi|^2 \cdot \gamma)) \quad (2.2)$$

Pada kanal *broadband*  $\psi_n$  merupakan *multipath* dimana  $n = \{1,2,3,\dots,N\}$  dengan N adalah panjang blok transmisi. Kemudian kapasitas kanal dengan mempertimbangkan  $E_b/N_0$  [22] [23]:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^n \log_2(1 + (m \cdot R \cdot |\psi|^2 \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{N}{N+Q})) \quad (2.3)$$

Pada kanal *broadband*,  $\psi_n$  merupakan *multipath* dimana  $n = \{1,2,3,\dots,N\}$  dengan N adalah panjang blok transmisi.  $\psi_n$  dapat dijabarkan dengan [22] [23]:

$$\psi = \text{diag}[F \cdot H_c \cdot F^H] \quad (2.4)$$

Dimana F adalah matriks *Fast Fourier Transform* (FFT),  $H_c$  adalah matriks circulant hasil penamabahan *cyclic prefix* (CP), dan  $F^H$  adalah matriks *invers Discrete Fourier Transform* (IDFT). Hubungan SNR dengan  $E_b/N_0$  dapat didefinisikan dengan [22] [23]:

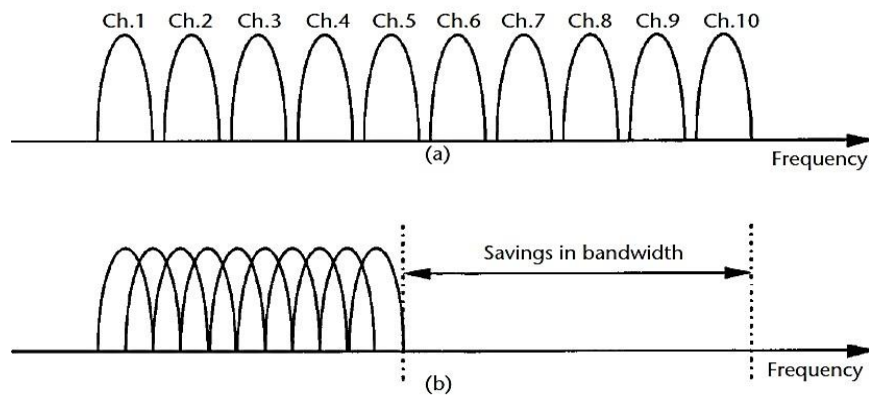
$$\gamma = \frac{E_b}{N_0} \cdot M \cdot R \cdot \frac{N}{N+Q} \quad (2.5)$$

Dengan m adalah indeks modulasi, jika dengan modulasi BPSK  $M = 2$  maka indeks modulasi  $\log_2(M) = 1$ , sehingga memuat 1 bit per simbol. R adalah *channel coding rate*, dan Q adalah panjang CP. Berdasarkan *numerology* OFDM maka panjang CP (Q) dapat didefinisikan menjadi [22] [23]:

$$Q_i = \frac{T_{cp(i)}}{T_{ofdm(i)}} \cdot N_{fft} \quad (2.6)$$

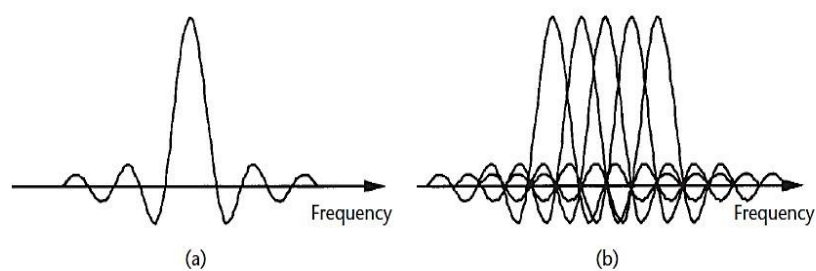
### 2.2.8 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Secara umum, propagasi *multipath* pada komunikasi *broadband* adalah *frequency-selective fading*, yang disebabkan adanya *spread* pada waktu kedatangan atau dikenal sebagai *delay spread* yang menimbulkan *intersymbol interference* (ISI) dari beberapa komponen *multipath*. ISI secara signifikan mampu menurunkan performansi sistem komunikasi *wireless*. Untuk mengatasi ISI dimana suatu sistem *broadband* tidak memerlukan *equalizer*, maka diperlukan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM).



**Gambar 2.3 Konsep sinyal OFDM: (a) teknik *multicarrier* konvensional, dan (b) teknik OFDM [19].**

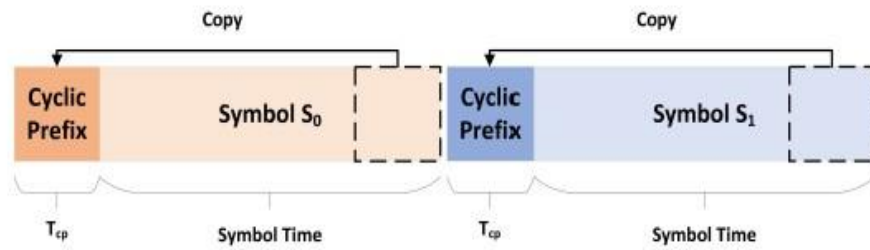
OFDM merupakan teknik multipleksing yang memiliki kasus khusus dari transmisi *multicarrier*, dimana aliran data tunggal ditransmisikan melalui sejumlah *subcarrier* (SC) dengan *rate* yang rendah [20]. Pada Gambar 2.5 (a) mengilustrasikan perbedaan antara teknik konvensional *multicarrier nonoverlapping* pada *frequency division multiplexing* (FDM) dan Gambar (b) teknik modulasi *multicarrier overlapping* dengan implementasi *orthogonal* antara modulasi *carrier* yang berbeda pada OFDM. Pada modulasi OFDM menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) sedangkan demodulasi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT).



**Gambar 2.4 Spektra: (a) spektrum data tunggal dari *subchannel* dan (b) sinyal OFDM yang dimultipleksing [19].**

### 2.2.9 *Cyclic-Prefix* (CP)

*Cyclic Prefix* (CP) merupakan elemen penting dalam OFDM pada kanal *multipath fading*.



**Gambar 2.5 Ilustrasi Cyclic Prefix [23]**

Pada Gambar 2.7 merupakan konsep *Cyclic Prefix*, dimana melakukan penggandaan bagian akhir simbol OFDM sebagai simbol *prefix*. *Cyclic Prefix* secara umum memiliki fungsi [23] [22]:

- Menyediakan *guard interval* untuk menghapus ISI dari simbol sebelumnya.
- Menggandakan simbol akhir, seperti pada linier konvolusi dari kanal *frequency selective* dapat dilakukan perhitungan konvolusi *circular*, untuk estimasi kanal sederhana dan ekualisasi.
- Untuk menjamin performansi bebas ISI, panjang *Cyclic Prefix* adalah sama atau lebih lebar dari jumlah PDP.

Ketika CP ditambahkan pada sisi *transmitter* (dan dieliminasi pada sisi *receiver*), matriks kanal  $H_c$  menjadi *circulant* [24]. Konsep CP dapat dijelaskan secara sederhana jika PDP memiliki  $h = [h_0, h_1]$  dan data yang ditransmisikan  $x$  ditambahkan panjang CP ( $Q$ ) = 3 yaitu  $x_{cp} = [d e | a b c d e]$ , maka pada sinyal *receiver* ( $y$ ) dengan tambahan *noise* ( $n$ ) ditentukan sebagai berikut [22]:

$$y = Hx + n \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ e \\ a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \\ n_8 \end{bmatrix}$$

Eliminasi CP pada *receiver* sehingga hanya blok yang diperlukan saja yang diambil seperti berikut:

$$y = \begin{bmatrix} h_{1e} + h_{0a} \\ h_{1a} + h_{0b} \\ h_{1b} + h_{0c} \\ h_{1c} + h_{0d} \\ h_{1d} + h_{0e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix}$$

Atau  $y$  dapat diperoleh dari perkalian antara matriks *circulant*  $H_c$  dengan  $x$  karena matriks *circulant* bernilai sama dengan matriks hasil dari transmisi menggunakan CP.

$$= \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \\ n_7 \end{bmatrix}$$

### 2.2.10 Numerology OFDM 5G NR

Penerapan teknologi radio akses 5G NR memiliki opsi kategori frekuensi di bawah 6 GHz dan di atas 6 GHz maka dibutuhkan *support* layanan yang berbeda-beda. OFDM tunggal tidak dapat memenuhi kebutuhan performansi seluruh rentang frekuensi yang diimplementasikan sehingga diperlukan OFDM *numerology* untuk 5G *radio access technology* (RAT), dimana berisikan *subcarrier spacing*, *cyclic prefix length* dan lain-lain sebagai berikut [25]:

**Tabel 2.3 Numerology OFDM pada 5G NR [25]**

<i>Parameter / Numerology</i> ( $\mu$ )	0	1	2	3	4
<i>Parameter / Numerology</i> (KHz)	15	30	60	120	240
<i>OFDM Symbol Duration</i> ( $\mu$ s)	66,67	33,33	16,67	8,33	4,17
<i>Cyclic Prefix Duration</i> ( $\mu$ s)	4,69	2,34	1,17	0,57	0,29
<i>OFDM Symbol incl. CP</i> ( $\mu$ s)	71,35	35,68	17,84	8,92	4,46
<i>Bandwidth minimum</i> (MHz)	4,32	8,64	17,28	34,56	69,12
<i>Bandwidth maximum</i> (MHz)	49,5	99	198	396	397,44

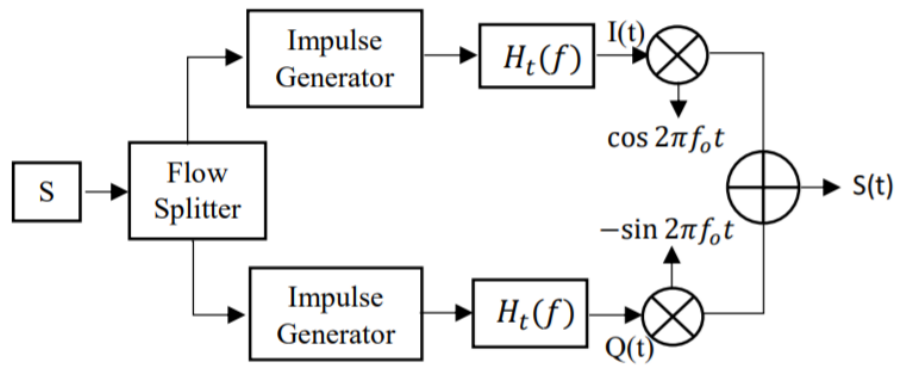
### 2.2.11 Modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)

Teknik modulasi QAM, yang merupakan pengembangan ASK (*Amplitude Shift Keying*) dan PSK (*Phase Shift Keying*), adalah suatu bentuk dari modulasi digital dimana sinyal informasi digital diubah amplitudo dan fasenya ke dalam fungsi gelombang pembawa. Modulasi QAM membagi sinyal yang ditransmisikan menjadi dua bagian atau *bit stream*, yaitu *Inphase* dan *Quadrature phase*. Kedua bagian ini berbeda fasa 90 derajat, karena *bit stream In-phase* dikalikan dengan sinyal cosinus, sedangkan bagian *quadrature* dikalikan dengan sinyal sinus.

Dalam pentransmisian data, kedua bagian tersebut digabungkan menjadi persamaan berikut:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_o t) - Q(t) \sin(2\pi f_o t) \quad (2.8)$$

Berikut merupakan blok diagram modulasi dari QAM dengan frekuensi *carrier*  $f_o$  dan  $H_t$  respon frekuensi dari filter transmisi.



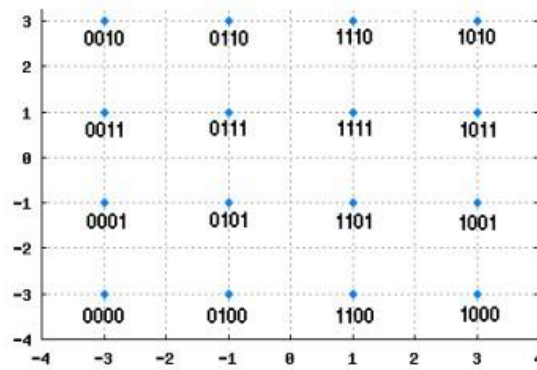
**Gambar 2.6 Modulator QAM [26]**

Jika dibandingkan dengan modulasi yang lainnya, modulasi QAM memiliki keuntungan yaitu dari segi kecepatan dalam transmisi data, peluang kesalahan simbol lebih kecil, dan efisien dalam penggunaan *bandwidth*. Hal ini dikarenakan banyaknya jumlah *bit* informasi yang diwakilkan oleh satu simbol. Makin tinggi orde modulasinya, makin cepat transmisi datanya namun justru makin sensitif terhadap *noise*.

Untuk bentuk umum dari sinyal M-QAM ditunjukkan oleh persamaan berikut [26]:

$$S(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} I(t) \cos[2\pi f_o t] - \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} Q(t) \sin[2\pi f_o t] \quad (2.9)$$

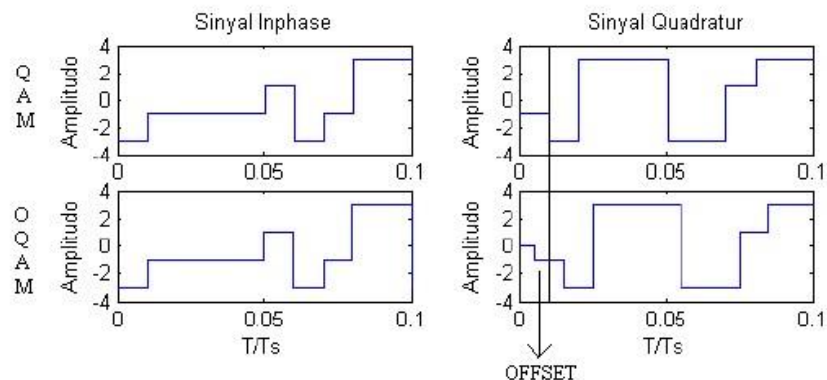
Dengan  $E_{min}$  adalah energi dari sinyal pada amplitudo terendah dan  $a_i$ ,  $b_i$  adalah bilangan integer yang dipilih sesuai dengan letak sinyal. Kemungkinan nilai  $I(t)$  dan  $Q(t)$  adalah  $\pm 1$  dan  $\pm 3$ .  $I(t)$  dan  $Q(t)$  adalah elemen dari matriks  $L \times L$  dengan  $L = \sqrt{M}$  seperti persamaan berikut dengan contoh modulasi 16-QAM ( $M=16$ ,  $L=4$ ) [26].



Gambar 2.7 Mapping kode Gray bit data ke titik konstelasi 16-QAM [26]

### 2.2.12 Modulasi Offset- Quadrature Amplitude Modulation (O-QAM)

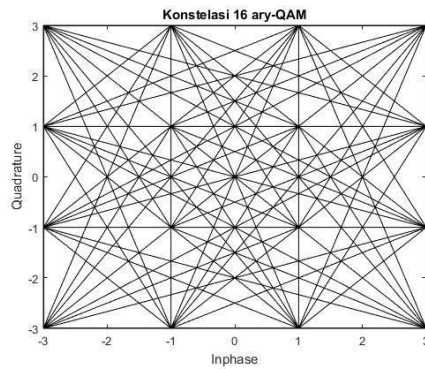
Sistem modulasi yang sering dipakai yaitu QAM dengan *guard interval* dan OQAM dengan *pulse shaping*. Gambar 2.10 menunjukkan perbedaan antara modulasi QAM dan OQAM, *bit-bit* pada posisi *inphase* tetap pada posisi semula sedangkan terjadi *offset* atau pergeseran *bit* pada sisi *quadrature*.



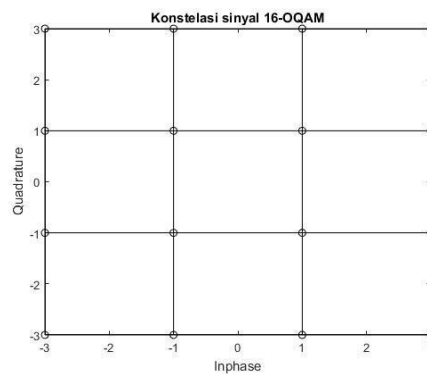
Gambar 2.8 Sinyal Modulasi pada QAM dan OQAM [26]

Konstelasi dari sinyal QAM dapat dilihat pada Gambar 2.10 yang menunjukkan modulasi QAM setiap titik memiliki energi simbol yang menyebar pada keenambelas titik lainnya.





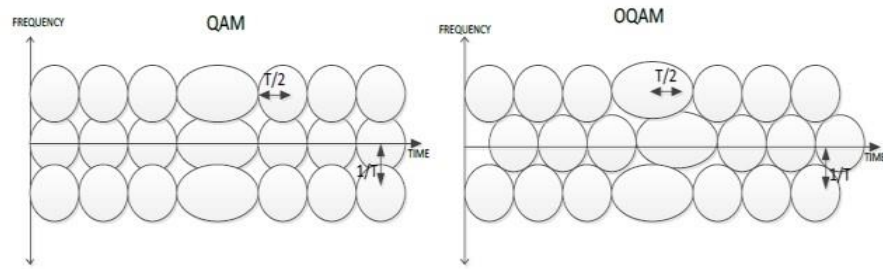
**Gambar 2.9** Konstelasi 16 ary-QAM [27]



**Gambar 2.10** Konstelasi 16 ary- OQAM [27]

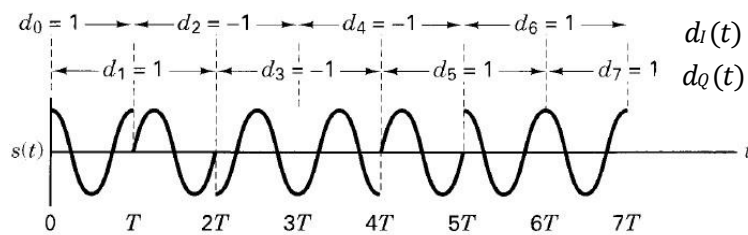
Konstelasi dari sinyal OQAM dapat dilihat pada Gambar 2.11. Sedangkan dari Gambar 2.12 dapat dilihat untuk modulasi OQAM setiap titik memiliki energi simbol yang menyebar pada kedua titik lainnya.

Dengan skema OQAM, spektrum kanal yang berdekatan terjadi *overlap* tanpa mengakibatkan *crosstalk* antar *subcarrier* yang dikarenakan penundaan setengah simbol waktu antara komponen *inphase* dan *quadrature* sinyal pada setiap *subcarrier*. *Crosstalk* dipindahkan atau digeser ke sampel genap pada saat simbol kompleks ditransmisikan dari sampel ganjil. Hal ini akan mengurangi efek dari ICI (*Intercarrier Interference*) karena terjadi pengurangan jarak kanal yang berdekatan pada *subcarrier*.



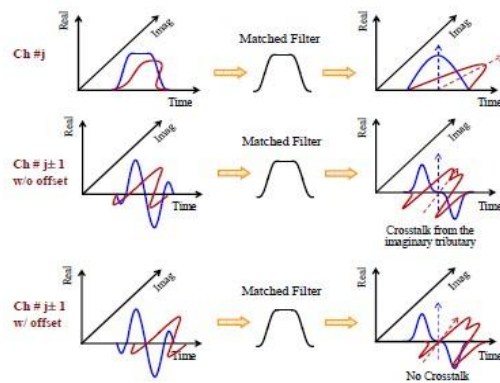
**Gambar 2.11** Skema representasi *time-frequency* bagian *real* dari *single pulse* pada QAM (kiri) dan pada OQAM (kanan) [28]

Pada modulasi *Offset QAM*, terjadi pergeseran fasa dibatasi hingga  $0^\circ$  dan  $\pm 90^\circ$  setiap  $T$  detik, tidak seperti pada QAM yang terjadi lompatan fasa hingga  $180^\circ$ . Berbeda dengan modulasi QAM, kanal I dan Q OQAM tidak mengalami transisi pada waktu yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa transisi tidak pernah melebihi dari  $90^\circ$  [28].



**Gambar 2.12** Bentuk gelombang sinyal Offset QAM [29]

*Offset QAM* dapat secara signifikan mencapai kondisi yang diperlukan untuk mendekati operasi *free-crosstalk*. Pada *matched filter*, saluran pusat memperoleh nilai maksimal pada titik sampling. Angka ini jelas menunjukkan bahwa ada sisa *crosstalk* dari saluran tambahan imajiner  $j\pm 1$  tanpa *offset*. Di sisi lain, *crosstalk* dapat dihilangkan jika saluran tambahan imajiner tertunda sebesar  $T/2$  [30].

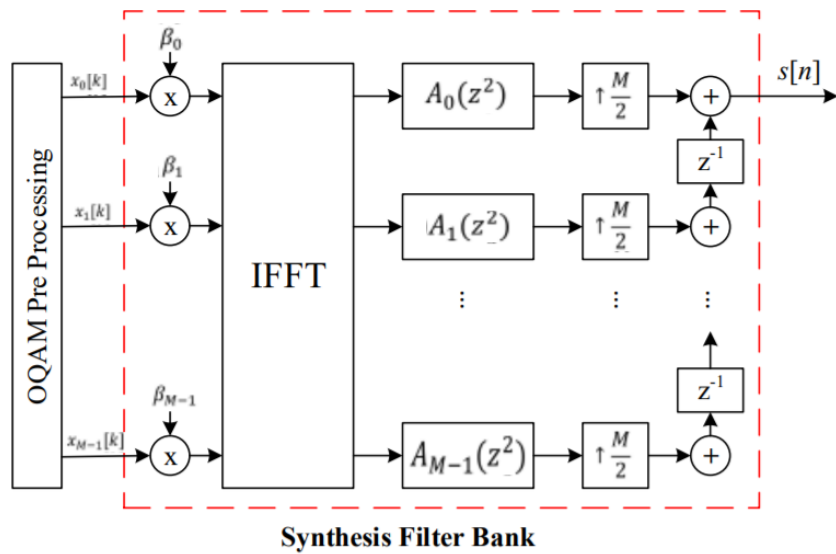


**Gambar 2.13** Ilustrasi *Crosstalk* menggunakan *raised-cosine pulse* [28]

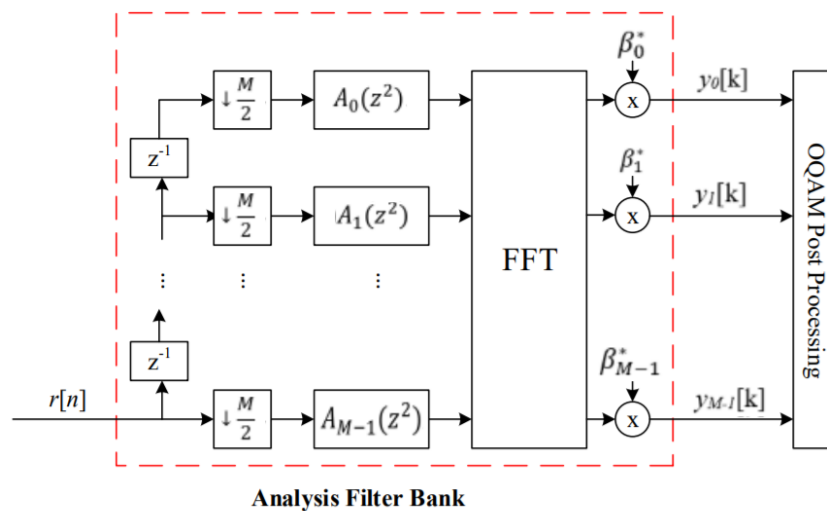
### 2.2.13 Filter Bank Multi Carrier (FBMC)

FBMC terdiri dari 2 proses di dalamnya yaitu pra pemrosesan dan pasca pemrosesan. Proses pada pra pemrosesan di FBMC bernama sintesis *bank filter*. Sedangkan pada pasca pemrosesan disebut sebagai analisis *bank filter*. Sintesis *bank filter* diletakkan pada proses pengiriman data tepatnya sesudah proses pra pengolahan O-QAM. Sedangkan di sisi penerima proses analisis berada sebelum proses pasca pengolahan O-QAM. Adapun proses di dalam filter bank ditunjukkan pada Gambar 2.16 dan Gambar 2.17. Berdasarkan Gambar 2.16, sintesis *bank filter* terdiri dari 2 proses yaitu proses IFFT dan proses filter. Filter pada sintesis *bank filter* digunakan untuk memisahkan sinyal berdasarkan frekuensinya. Jenis filter yang digunakan pada sintesis *bank filter* dapat menggunakan berbagai jenis filter.

Jenis filter yang paling mudah adalah filter ideal. Konsep pada filter ideal adalah frekuensi yang ada akan langsung diteruskan atau diloloskan tanpa adanya peredaman. Berdasarkan Gambar 2.17, analisis *bank filter* terdiri dari 2 proses yaitu proses FFT dan proses filter. Filter pada analisis *bank filter* digunakan untuk menggabungkan sinyal berdasarkan frekuensinya. Jenis filter yang digunakan pada analisis *bank filter* harus sesuai dengan jenis filter yang digunakan pada proses sintesis *bank filter* [31].



**Gambar 2.14** Konfigurasi pada Sintesis *Bank filter* [31]



**Gambar 2.15** Konfigurasi pada Analisis *Bank filter* [31]

#### 2.2.14 Kanal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*)

Kanal AWGN merupakan kanal yang sering digunakan dalam sistem komunikasi, suatu kanal ketika informasinya diberi gangguan berupa penambahan linear dari *white noise* dengan kerapatan spektrum yang konstan dan distribusi *gaussian* dari *sample noise*. Selain itu AWGN dapat disebabkan oleh faktor lain seperti suhu antenna dan *multipath fading* [32].

AWGN merupakan *noise* yang pasti terjadi dalam jaringan nirkabel manapun, memiliki sifat-sifat *additive*, *white*, dan *gaussian*. Sifat *additive* artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal, sifat *white* artinya *noise* tidak bergantung pada frekuensi sistem operasi dan memiliki rapat daya yang konstan, dan sifat *gaussian* artinya besarnya tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi *gaussian* [32]. Biasanya *white noise* dihasilkan dalam simulasi dengan fungsi *rand*, sedangkan *Gaussian noise* dihasilkan dengan fungsi *randn* pada MATLAB. AWGN ini adalah *noise* alami, yang selalu ada di setiap perangkat. Jadi pada setiap perhitungan komunikasi yang melalui kanal maka harus ditambahkan AWGN.

Untuk probabilitas kemunculan derau dapat dihitung dengan persamaan berikut [32]:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.10)$$

Dengan:

P(x) : Probabilitas kemunculan derau

$\sigma$  : Standar deviasi

m : Rataan

x : Variabel tegangan atau daya sinyal

Kekuatan AWGN dapat ditentukan dari persamaan berikut [32]:

$$N = KTB \quad (2.11)$$

dengan:

N = Kekuatan *noise*

K = Konstanta *Boltzmann* (K=1,38 x 10<sup>-23</sup> Joules/Kelvin)

T = Temperatur *absolute* (°C)

B = *Bandwidth* (Hz)

Dapat dipahami bahwa keberadaan *noise* AWGN dalam jaringan *wireless*, bahkan jaringan telekomunikasi manapun, akan selalu ada selama terdapat *bandwidth* dan temperatur perangkat telekomunikasi yang bekerja pada suhu di atas -273 °C [32].

## 2.2.15 Parameter Pengujian Sistem

### A. *Bit error rate (BER)*

*Bit error rate (BER)* merupakan sejumlah bit digital yang bernilai tinggi pada jaringan transmisi yang di definisikan sebagai keadaan rendah atau sebaliknya, kemudian dibagi dengan sejumlah bit yang diterima atau dikirim atau diproses selama beberapa periode yang telah ditetapkan. Jumlah bit *error* merupakan jumlah bit salah yang diterima dibagi dengan jumlah bit yang dikirimkan [32].

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit salah}}{\text{Jumlah bit kirim}} \quad (2.12)$$

Kinerja sistem komunikasi dapat dikatakan baik, jika bit yang salah saat pengiriman semakin sedikit dengan kata lain BER yang dihasilkan bernilai kecil. Berdasarkan penjelasan mengenai pesat gelat bit dengan simbol yang terdiri dari beberapa bit (tergantung level modulasi yang digunakan), maka dapat dilakukan pendekatan mengenai hubungan antar keduanya seperti pada persamaan berikut [33]:

$$\frac{1}{k} \leq \frac{P_B}{P_S} \leq \frac{2^{k-1}}{2^{k-1}} = \frac{M/2}{M/1} \quad (2.13)$$

Dimana  $P_B$  merupakan probabilitas pesat galat bit,  $P_S$  adalah probabilitas galat simbol,  $M=2K$  adalah level modulasi pada sistem M-ary dan  $k$  merupakan orde modulasi. Jadi, untuk sistem 16-QAM yang digunakan pada simulasi ini akan mempunyai  $M=16$  dan  $k=4$ .

### B. *Signal to Noise Ratio (SNR)*

*Signal to Noise Ratio (SNR)* merupakan suatu ukuran yang menentukan kualitas sebuah sinyal yang telah terganggu oleh derau (*noise*). Perhitungan SNR menggunakan perbandingan daya suatu sinyal terhadap daya yang dimiliki oleh *noise*. Adapun hubungan antara daya sinyal dengan daya *noise* tampak pada persamaan berikut [34]:

$$SNR = \log \frac{S}{N} \quad (2.14)$$

Simbol  $S$  merupakan rata-rata daya sinyal (Watt) dan  $N$  merupakan daya *noise* (Watt). Persamaan tersebut memiliki kesimpulan bahwa semakin kecil nilai *noise* yang terkena sinyal menghasilkan nilai SNR

yang besar. Semakin besar nilai SNR yang dihasilkan maka semakin baik kualitas sinyal yang dihasilkan.